

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

(11) N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

**2 581 261**

(21) N° d'enregistrement national :

**85 06572**

(51) Int Cl<sup>a</sup> : H 01 S 3/05; G 04 F 5/14.

(12)

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 30 avril 1985.

(30) Priorité :

(43) Date de la mise à disposition du public de la  
demande : BOPI « Brevets » n° 44 du 31 octobre 1986.

(60) Références à d'autres documents nationaux appa-  
rentés :

(71) Demandeur(s) : Société dite : Compagnie d'Electronique  
et de Piézo-Electricité - C.E.P.E. — FR.

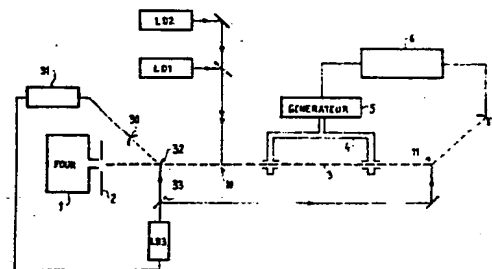
(72) Inventeur(s) : Pierre Cerez et Gerardo Avila.

(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire(s) : Jean Lehu, THOMSON-CSF, SCPL.

(54) Résonateur à césium à pompage optique et détection par diode laser.

(57) La présente invention a pour objet un résonateur à cé-  
sium à pompage optique et détection par diode laser dans  
lequel cette diode laser (LD3) est asservie en fréquence sur un  
signal délivré par un détecteur 30 captant la lumière de  
fluorescence émanant d'une zone d'interaction 32 créée juste à  
la sortie du four à césium 1 par l'interaction du jet d'atomes  
de césium et d'une partie du faisceau lumineux émis par la  
diode de détection (LD3).



FR 2 581 261 - A1

D

Vente des fascicules à l'IMPRIMERIE NATIONALE, 27, rue de la Convention — 75732 PARIS CEDEX 15

## RESONATEUR A CESIUM A POMPAGE OPTIQUE ET DETECTION PAR DIODE LASER

La présente invention concerne un résonateur à césium à pompage optique et détection par diode laser.

Actuellement, plusieurs milliers d'horloges atomiques sont en service. Cependant, les systèmes modernes de télécommunication, de navigation et de localisation, ainsi que des recherches de physique fondamentale et appliquée requièrent l'emploi d'horloges de plus en plus précises, et dans certains cas les performances actuelles des horloges atomiques sont insuffisantes pour satisfaire les besoins exprimés. Des progrès sont donc encore nécessaires.

Dans les réalisations les plus courantes actuelles, les atomes sont défléchis dans un premier aimant à deux pôles créant un champ intense et inhomogène. On obtient ainsi une séparation spatiale des atomes dont l'énergie est fonction croissante du champ magnétique (états  $F = 4$ ,  $m_F \geq -3$ ) et des atomes dont l'énergie est fonction décroissante du champ (états  $F = 4$ ,  $m_F = -4$  et  $F = 3$ ,  $m_F \geq -3$ ). Les états les plus intéressants,  $F = 4$ ,  $m_F = 0$  et  $F = 3$ ,  $m_F = 0$  entre lesquels la transition d'horloge est effectuée appartiennent à l'un ou l'autre groupe. A l'entrée dans une cavité résonnante, le faisceau est enrichi en l'un ou l'autre des états  $F = 4$ ,  $m_F = 0$  ou  $F = 3$ ,  $m_F = 0$  selon les réalisations. En fonctionnement normal, le rôle de la cavité résonnante est de permettre la transition  $F = 3$ ,  $m_F = 0 \rightarrow F = 4$ ,  $m_F = 0$ . Un second aimant semblable au premier défléchit vers un détecteur à fil chaud les atomes qui ont subi la transition d'horloge.

M.A. KASTLER a proposé en 1950 de remplacer les aimants de sélection d'état et de détection par des zones d'interaction entre les atomes et un faisceau lumineux. Le bien-fondé de cette proposition a été vérifié par P. CERREZ en 1968 sur un jet de rubidium. L'intérêt actuel de ces méthodes optiques réside dans les développements des lasers à semi-conducteurs. Certains de ceux-ci génèrent un faisceau

à 0,85  $\mu\text{m}$ , en coïncidence satisfaisante (après tri) avec la raie de résonance D2 de l'atome de césium.

Si la sélection d'état est effectuée à l'aide d'un seul laser, on peut peupler le niveau  $F = 4$ ,  $m_F = 0$  au détriment du niveau  $F = 3$ ,  $m_F = 0$ , ou réciproquement.

Il est possible d'utiliser deux lasers LD1, LD2 pour le pompage optique. On peut alors espérer transférer la totalité des atomes peuplant les 16 sous-niveaux soit sur le niveau  $F = 4$ ,  $m_F = 0$ ; soit sur le niveau  $F = 3$ ,  $m_F = 0$ . L'accroissement du flux d'atomes dans l'un des niveaux utiles est favorable aux performances de l'horloge.

La détection de la transmission d'horloge s'effectue en observant la lumière de fluorescence émise par les atomes interagissant avec le faisceau laser issu d'une troisième diode laser LD3 accordée sur une transition fermée à haut rendement en photons par atome.

Ce résonateur à césium à pompage et détection optiques selon l'art connu comporte un four émettant un jet de césium, une cavité résonnante située sur le parcours du jet, une première zone d'interaction dans laquelle les faisceaux de deux diodes laser LD1 et LD2 interagissent avec les atomes de manière à créer une inversion de populations par pompage optique, une troisième diode laser LD3 émettant un faisceau qui interagit avec le flux atomique à la sortie de la cavité, deux détecteurs de fluorescence et des moyens d'asservissement de la fréquence des diodes.

Mais le point le plus délicat est la détection optique. De grandes précautions doivent être prises pour stabiliser la fréquence du laser LD3 car les fluctuations résiduelles de sa fréquence sont transformées en fluctuations d'amplitude de la lumière de détection. Il en résulte une réduction du rapport signal sur bruit à la détection du signal d'horloge et en conséquence une dégradation de la stabilité de fréquence de l'horloge.

Il n'est pas avantageux de mettre à profit le signal de fluorescence de la zone de détection pour stabiliser la fréquence de LD3 car ce dernier est faible.

Afin de pallier ces inconvénients, l'invention propose d'améliorer la détection optique du résonateur à césium à trois diodes laser. Pour ce faire, la troisième diode laser est asservie dans une troisième zone d'interaction située immédiatement à la sortie du four. Une partie seulement du faisceau de cette troisième diode est dirigée vers la deuxième zone d'interaction comme dans le cas du résonateur à trois diodes de l'art connu.

Les avantages du résonateur selon l'invention sont les suivants :

1) une meilleure stabilité en fréquence de la diode est obtenue grâce au très bon rapport signal sur bruit avec lequel on détecte cette fluorescence. L'asservissement peut être rapide, ce qui entraîne une réduction considérable du bruit de fréquence de la diode. Cela évite d'avoir recours par exemple à une boucle intermédiaire de préstabilisation sur un résonateur de Fabry Perot très stable;

2) cette solution ne perturbe pas l'inversion de populations utiles "zéro-zéro" créée en aval, dans la première zone d'interaction car une transition fermée ne produit pas de transfert de populations entre les niveaux hyperfins du fondamental.

L'invention a pour objet un résonateur à césium à pompage optique et détection par diode laser comportant un four à césium émettant un flux d'atomes de césium, une cavité résonnante située sur le parcours dudit flux, au moins une première diode laser LD1 et éventuellement une seconde diode laser LD2 délivrant un faisceau lumineux qui interagit avec le flux d'atomes en une première zone d'interaction située entre le four et la cavité de manière à créer un pompage optique, un générateur de fréquence de résonance hyperfine du césium, des moyens de détection de la fluorescence émise par les atomes de césium à la sortie de la cavité, lesdits moyens de détection comprenant un premier détecteur de la lumière de fluorescence émanant d'une seconde zone d'interaction résultant de l'interaction du jet d'atomes sortant de la cavité et d'un faisceau lumineux émis par une troisième diode laser LD3, le premier

détecteur délivrant un signal représentatif de la seconde interaction vers des moyens d'asservissement de manière à asservir la fréquence du générateur sur la transition hyperfine du césium. Il est caractérisé en ce qu'une partie du faisceau lumineux émis par la troisième diode LD3 est dirigée sur le flux d'atomes sortant du four pour créer une troisième zone d'interaction, et qu'un second détecteur captant la lumière de fluorescence émanant de la troisième zone d'interaction délivre un signal représentatif de cette troisième interaction vers des moyens d'asservissement en fréquence de ladite troisième diode laser LD3.

L'invention sera mieux comprise à l'aide des exemples de réalisation suivants, donnés à titre non limitatif, conjointement avec les figures qui représentent :

- la figure 1, un résonateur à césium à pompage optique de l'art antérieur;
- la figure 2, un schéma illustrant le principe de l'asservissement en fréquence d'un oscillateur de ce résonateur;
- la figure 3, le résonateur selon l'invention.

Depuis 1967, la seconde est définie comme "la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133". L'horloge à césium est l'appareil qui permet de réaliser cette définition. A cet égard, il existe deux classes d'horloges à jet de césium :

- les étalons primaires de fréquence et de temps. Ce sont des appareils de laboratoire conçus pour réaliser la définition avec la plus grande exactitude possible;
- les horloges à jet de césium qui sont industrialisées et pour lesquelles un compromis satisfaisant entre les performances d'une part et l'encombrement, la fiabilité et le coût d'autre part, doit être établi.

Si on appelle  $N_1$  et  $N_2$  les populations des niveaux d'énergie  $E_1$  et  $E_2$ , la loi de Boltzmann indique qu'à l'équilibre thermodynamique, on a :

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp(-h\nu/kT)$$

où  $k$  est la constante de Boltzmann et  $T$  la température absolue. Pour  $\nu = 10$  GHz, on a  $h\nu = 6.6 \times 10^{-24}$  J et pour  $T = 300$  K,  $kT = 4,1 \times 10^{-21}$  J. Dans ces conditions,  $(N_2 - N_1)/N_1 = 1,5 \times 10^{-3}$  et cette différence de population est beaucoup trop faible pour observer avec un rapport signal sur bruit satisfaisant toute modification des propriétés atomiques résultant d'une transition de structure hyperfine. Il est donc nécessaire de rompre l'équilibre thermodynamique et de mettre en oeuvre des méthodes créant une différence de population. Celles-ci sont de deux types : déflection magnétique et pompage optique.

Les premiers résonateurs à jet de césium du type à déflection magnétique comportaient un four à césium pour produire le jet atomique, un premier aimant de sélection, une cavité résonnante à deux bras, un deuxième aimant et des circuits de détection et d'analyse.

Dans un petit nombre d'horloges de laboratoire destinées à réaliser au mieux la définition de l'unité de temps, les aimants à deux pôles sont remplacés par des aimants multipolaires (quadripolaire, hexapolaire ou une combinaison des deux). Parmi d'autres avantages, leur intérêt principal résulte de ce que leurs propriétés vis-à-vis de la déflection des atomes est à symétrie axiale. Contrairement au cas précédent, le four, les aimants et le détecteur sont alignés. En outre, les aimants multipolaires permettent un accroissement de l'intensité du jet atomique; leur emploi est donc favorable à la stabilité de fréquence de l'horloge.

Pour tenter de diminuer les erreurs résiduelles, on a développé récemment une horloge à jet de césium où on a remplacé les aimants de Stern-Gerlach par un pompage optique et une détection optique de la résonance hyperfine selon une suggestion de A. Kastler.

Avant l'apparition de lasers dans le proche infra-rouge, une tentative de pompage optique d'un jet de rubidium 87 avec des lampes spectrales avait été essayée avec succès, mais le rapport signal/bruit de la détection n'était pas suffisant pour une utilisation en horloge atomique de haute précision.

Le développement de lasers accordables (lasers à semi-conducteurs ou lasers à colorant) a rendu possible le pompage hyperfin efficace d'un jet de césium. Par exemple, avec une diode laser en arséniure de gallium GaAs, la longueur d'onde émise est ajustée au voisinage de la raie de résonance  $D_2$  du césium (852,1 nm) par variation de la température et accordée finement à une composante hyperfine déterminée par variation du courant dans la diode.

La méthode du pompage optique est donc basée sur le fait de remplacer les aimants de sélection d'état et de détection par des zones d'interaction entre les atomes et un faisceau lumineux. L'intérêt actuel de cette méthode optique réside dans les développements des lasers à semi-conducteurs. Certains de ceux-ci génèrent un faisceau lumineux à 0,85  $\mu\text{m}$ , en coïncidence satisfaisante (après tri) avec la raie de résonance  $D_2$  de l'atome de césium.

Si la sélection d'état est effectuée à l'aide d'un seul laser, on peut peupler le niveau  $F = 4$ ,  $m_F = 0$  au détriment du niveau  $F = 3$ ,  $m_F = 0$ , ou réciproquement. L'accroissement du flux d'atomes dans l'un des niveaux utiles est favorable aux performances de l'horloge.

La détection peut s'effectuer de façon optique également, en observant la lumière de fluorescence des atomes ayant subi la transition d'horloge, cette fluorescence résultant de l'irradiation par une diode laser LD3.

Le schéma de principe d'une telle horloge à césium à sélection d'états et à détection optique est représenté sur la figure 1. On peut utiliser l'un ou l'autre des lasers LD1 et LD2 ou les deux.

Les atomes de césium émergent du four 1 qui est porté à une température d'environ 100°C. Un diaphragme 2 permet la formation d'un jet atomique 3 représenté par un trait en pointillés. Le dispositif de la figure 1 est équipé d'une enveloppe étanche non

représentée qui permet d'effectuer un vide poussé tout au long du trajet du jet atomique. Le résonateur comprend encore une cavité résonnante 4 à deux bras, un générateur 5 d'une fréquence de 9 192 631 770 Hz. Il comporte en outre un asservissement de fréquence 6 et un détecteur à fluorescence 7. La zone 10 est la région de pompage optique. La zone 11 est la région de détection optique de la résonance micro-onde.

Le four 1 émet un flux d'atomes de césium 3 sur le parcours duquel sont situés les deux bras de la cavité résonnante 4. Un ou deux lasers LD1, LD2 délivrent un faisceau lumineux qui interagit avec le flux d'atomes en une zone d'interaction 10 située entre le four et la cavité de manière à créer un pompage optique.

Des moyens de détection optique des variations de populations introduites par la résonance micro-onde sont disposés à la sortie de la cavité résonnante 4 et des moyens d'asservissement en fréquence sont reliés à la sortie de ces moyens de détection et au générateur 5 de manière à asservir la fréquence de ce générateur sur la transition hyperfine du césium.

Une diode laser LD3 émet un faisceau lumineux qui interagit avec le flux d'atomes à la sortie de cette cavité résonnante 4.

Un détecteur 7 permet de recevoir la fluorescence émise par les atomes après cette interaction.

La cavité résonnante 4, introduite par Ramsey, est telle que la micro-onde est appliquée en deux régions de longueur  $l$  séparées par une distance  $L$  le long du jet. Cette technique permet une réduction par  $\frac{L}{l}$  de la largeur de la raie de résonance par rapport à une simple cavité résonnante de même longueur  $l$ , et elle permet, en outre, de réduire les effets d'inhomogénéité du champ magnétique directeur et d'éliminer l'effet Doppler du premier ordre, en utilisant une micro-onde stationnaire au lieu d'une onde progressive.

En modulant à basse fréquence le signal d'excitation micro-onde, un signal d'erreur continu est obtenu dans une détection synchrone reliée à la sortie du détecteur, la polarité de ce signal dépendant de la position relative des fréquences d'excitation micro-



onde et de résonance hyperfine. Une boucle d'asservissement peut compléter le système et asservir le quartz sur la transition hyperfine. Des diviseurs de fréquence permettent finalement d'obtenir des impulsions toutes les secondes. Des compteurs totalisateurs mécaniques ou électriques complètent l'horloge.

Ainsi, la figure 2 représente, de façon schématique, le principe de l'asservissement de la fréquence d'un oscillateur à quartz sur la résonance du tube à césium.

L'horloge à césium est un étalon de fréquence du type passif : il est nécessaire de produire le signal à la fréquence de la transition atomique afin de la mettre en évidence. Le signal micro-onde, qui alimente la cavité résonnante 4, est produit par un synthéiseur de fréquence 23 à partir d'un oscillateur à quartz 20 fonctionnant à 5 MHz.

La recherche de la fréquence de résonance du résonateur à césium s'effectue d'une manière très classique. Un modulateur de phase 22 permet la modulation de fréquence du signal micro-onde. La composante de la réponse du tube à césium qui possède une fréquence égale à la fréquence de modulation est amplifiée sélectivement et elle est démodulée par le démodulateur 24 en synchronisme avec le signal de modulation. Il en résulte un signal d'erreur lorsque la fréquence moyenne du signal micro-onde diffère de la fréquence de résonance du tube à césium, c'est-à-dire de la fréquence de la transition hyperfine de l'atome de césium dans l'état fondamental. Ce signal d'erreur est filtré dans un filtre opérationnel 25 dont la tension de sortie contrôle la fréquence de l'oscillateur à quartz 20. La fonction de transfert du filtre opérationnel 25, qui comprend au moins un intégrateur, est déterminée de façon à procurer à l'asservissement de fréquence les propriétés souhaitées, dont la plus importante est le temps de réponse à une perturbation.

L'ensemble qui vient d'être décrit est la partie principale de l'électronique associée au tube à césium. D'autres circuits assurent notamment la production d'impulsions marquant une échelle de temps.

A cette version d'horloge à césium, sont attachés de nombreux avantages potentiels (amélioration de la stabilité en fréquence à moyen et très long terme en particulier). Le point le plus délicat est donc la détection optique. De grandes précautions doivent être prises pour stabiliser la fréquence du laser LD3 car les fluctuations résiduelles de sa fréquence sont transformées en fluctuations d'amplitude de la lumière de détection. Il en résulte une réduction du rapport signal sur bruit à la détection du signal d'horloge et en conséquence une dégradation de la stabilité de fréquence de l'horloge.

Il n'est pas avantageux de mettre à profit le signal de fluorescence de la zone de détection pour stabiliser la fréquence de la diode laser LD3, car ce signal est faible.

L'invention permet d'asservir la fréquence de cette diode sur un signal beaucoup plus intense; celui-ci est obtenu tout près de la sortie du four selon le schéma de la figure 3.

Sur la figure 3, les mêmes références qu'à la figure 1 représentent les mêmes éléments. La diode LD3 émet, par l'intermédiaire du miroir semi-réfléchissant 33 un faisceau lumineux qui interagit avec le jet de césium à la sortie du résonateur (zone d'interaction 11). La lumière de fluorescence émanant de l'interaction est détectée comme précédemment. La différence principale entre le résonateur de l'art connu représenté à la figure 1 et celui de l'invention est qu'une partie du faisceau laser émis par la diode LD3 interagit avec le jet d'atomes de césium juste à la sortie du four (zone d'interaction 32). Le détecteur 30 capte la lumière de fluorescence des atomes et envoie un signal représentatif de cette fluorescence vers un circuit 31 d'asservissement en fréquence de la diode LD3.

Le résonateur de l'invention présente les avantages suivants :

1) une meilleure stabilité en fréquence de la diode grâce au très bon rapport signal sur bruit avec lequel on détecte cette fluorescence. L'asservissement peut être rapide, ce qui entraîne une réduction considérable du bruit de fréquence de la diode. Cela évite d'avoir recours par exemple à une boucle intermédiaire de préstabilisation sur un résonateur de Fabry Perot très stable;

2) le signal d'horloge apparait en effet comme une variation du nombre de photons de fluorescence lorsque l'on induit la résonance micro-onde à 9,192 GHz dans la cavité de Ramsey. Il se détache nécessairement sur un fond continu car ce fond sert au préalable à l'asservissement de la fréquence de LD3. Il sert également à l'asservissement général de l'horloge ce qui peut occasionner quelques inconvénients.

Cette invention permet de détecter la transition d'horloge sur un fond noir.

Cette solution ne perturbe pas l'inversion de population qui se crée dans la zone de pompage optique si l'on prend soin d'accorder le laser LD3 sur une transition fermée ( $F = 4 \rightarrow F' = 5$ , par exemple) qui a l'avantage d'avoir un bon rendement de fluorescence en photons par atome.

Dans une variante de l'invention, une partie de la puissance de sortie du laser LD3 ainsi stabilisé peut être envoyée vers la zone d'interaction 10 par l'intermédiaire d'un miroir semi-réfléchissant et d'un modulateur acousto-optique. On génère ainsi une onde à fréquence optique légèrement différente qui peut remplacer celle émise par la diode LD1 ou LD2. La fréquence nécessaire à la commande du modulateur acousto-optique peut être de 253 MHz.

Le résonateur de l'invention se distingue donc de celui illustré à la figure 1 en ce qu'il comprend en outre un second détecteur de fluorescence 30 et des moyens d'asservissement 31 recevant le signal issu de ce détecteur et relié en sortie à cette diode laser LD3, une partie du faisceau émis par cette diode laser LD3 interagissant avec le flux d'atome de césium avant la cavité résonnante 4, ce second détecteur 30 recevant la fluorescence émise par les atomes de césium après cette interaction.

La diode laser LD3 étant préstabilisée efficacement en fréquence dans la région 32 (sur une transition fermée  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  par exemple), il en résulte une amélioration de la détection optique du signal d'horloge.

On peut alors supprimer la diode laser LD2 et remplacer la diode LD3 par cette diode LD2. Cette solution permet donc d'économiser une diode.

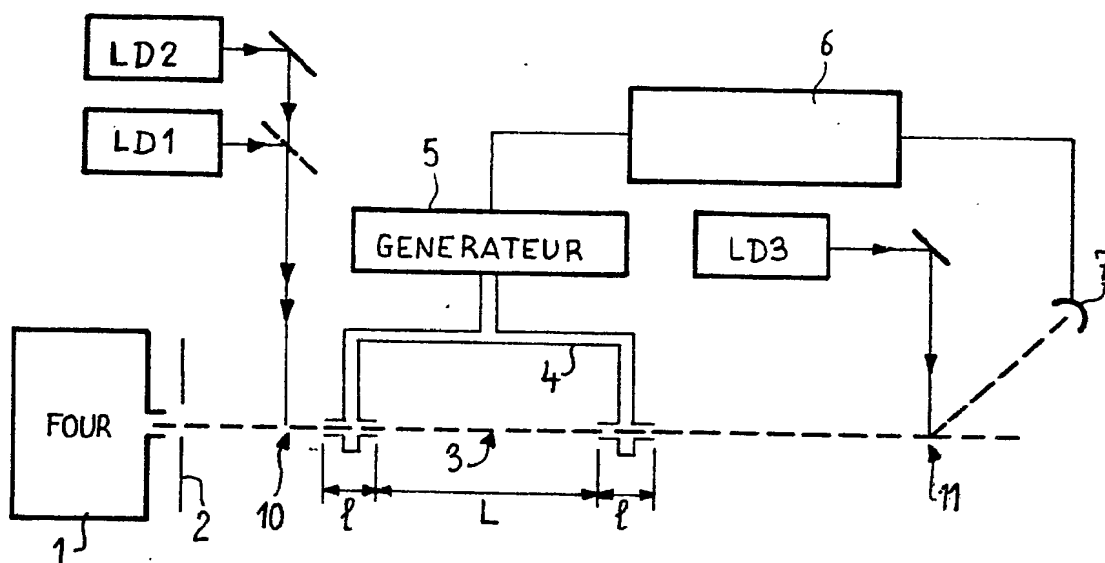
5 Le dispositif selon l'invention permet d'améliorer la stabilité en fréquence de l'horloge, par rapport aux réalisations de l'art connu.

REVENDICATIONS

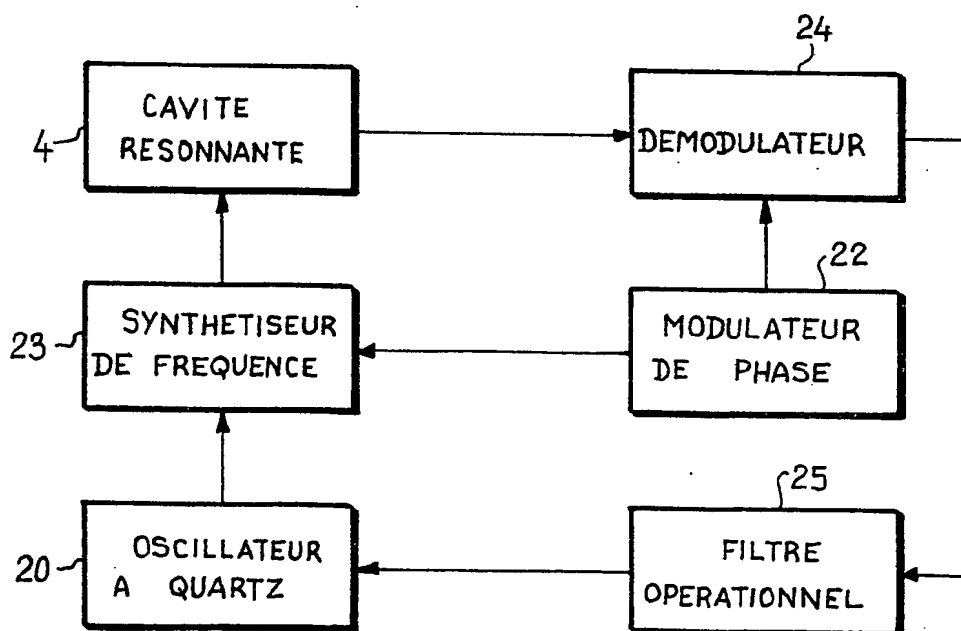
1. Résonateur à césium à pompage optique et détection par diode laser comportant un four à césium (1) émettant un flux d'atomes de césium (3); une cavité résonnante (4) située sur le parcours dudit flux, au moins une première diode laser (LD1) et éventuellement une seconde diode laser (LD2) délivrant un faisceau lumineux qui interagit avec le flux d'atomes en une première zone d'interaction (10) située entre le four (1) et la cavité (4) de manière à créer un pompage optique, un générateur (5) de fréquence de résonance hyperfine de césium, des moyens de détection de la fluorescence émise par les atomes de césium à la sortie de la cavité (4), lesdits moyens de détection comprenant un premier détecteur (7) de la lumière de fluorescence émanant d'une seconde zone d'interaction (11) résultant de l'interaction du jet d'atomes sortant de la cavité et d'un faisceau lumineux émis par une troisième diode laser (LD3), le premier détecteur (7) délivrant un signal représentatif de la seconde interaction vers des moyens d'asservissement (6) de manière à asservir la fréquence du générateur (5) sur la transition hyperfine du césium, caractérisé en ce qu'une partie du faisceau lumineux émis par la troisième diode (LD3) est dirigée sur le flux d'atomes sortant du four (1) pour créer une troisième zone d'interaction (32), un second détecteur (30) captant la lumière de fluorescence émanant de la troisième zone d'interaction et délivrant un signal représentatif de cette troisième interaction vers des moyens d'asservissement en fréquence (31) de ladite troisième diode laser (LD3).

2. Résonateur à césium selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'une autre partie du faisceau issu de la troisième diode laser (LD3) est prélevée pour être dirigée aux moyens d'un modulateur acousto-optique vers la première zone d'interaction (10).

1/2  
FIG\_1



FIG\_2





THIS PAGE BLANK (USPTO)